

航空发动机燃油污染快速检测技术的初步研究

刘宇佳,郎 宏,何 山,许秋玲,佟文伟
(中航工业沈阳发动机设计研究所,沈阳 110015)

摘要:针对航空发动机润滑系统受到燃油污染的问题,提出 1 种基于红外光谱分析的快速检测技术。利用傅里叶变换红外光谱技术(FIRT),结合偏最小二乘算法(PLS),建立了燃油污染定量检测的数学校正模型。讨论了不同光谱预处理方法和 PLS 因子数对模型预测能力的影响。通过对光谱预处理和优化建模参数,提高了模型的预测精度,在一定的燃油质量分数范围内,得到了较为理想的数学校正模型。使用建立的分析模型对预测集样本进行预测,预测值与实际值相关性良好,相关系数 $R=0.9994$,预测均方根误差 $R_{MSEP}=0.082$,重现性实验标准偏差 $S_D=0.044\sim 0.088$ 。研究结果表明该燃油污染快速检测技术是可行的。

关键词:红外光谱;润滑油;燃油污染;偏最小二乘回归;润滑系统;航空发动机

中图分类号:V231.2+1

文献标识码:A

doi:10.13477/j.cnki.aeroengine.2015.04.014

Preliminary Study on Rapid Detection Technology of Fuel Contamination in Lubrication System of Aeroengine

LIU Yu-jia, LANG Hong, HE Shan, XU Qiu-ling, TONG Wen-wei
(AVIC Shenyang Engine Design and Research Institute, Shenyang 110015, China)

Abstract: Aiming at the monitoring of contamination caused by fuel oil in lubrication system of an aeroengine, a kind of rapid detection technology base on infrared spectrum analysis technique was presented. By means of Fourier transform infrared spectrum technique (FTIR) combined with partial least square (PLS), a mathematical calibration model for the quantitative determination of contamination caused by fuel was established. Effects of various spectral pretreatment methods and PLS factor on the prediction ability of the model were discussed. With the help of the spectral pretreatment and parameter optimization, the prediction precision of the model is improved and the acceptable mathematical model is obtained. Using the model to predict the prediction set sample, a good correlation between predictive value and actual value is found. The correlation coefficient (R) is 0.9994, the root mean square error of prediction (R_{MSEP}) is 0.082 and the standard deviation (S_D) of the replicate test is 0.044-0.088. The results show that the rapid detection technology appears to be viable.

Key words: infrared spectrum; lubricant; fuel contamination; partial least square regression; lubrication system; aeroengine

0 引言

现代航空发动机的发展趋势是高转速、高性能、长寿命,使得发动机在使用中具有更高的安全性和可靠性。除设计、零部件生产工艺及产品质量因素外,润滑系统的运行状况对发动机的健康运转和使用寿命具有重要意义。航空发动机润滑系统散热器故障或密封部件失效时会发生串油故障,使滑油系统受到燃油的污染,从而使润滑油性能降低,造成机械部件润滑不良,加速磨损;燃油中的不饱和烃还会加剧润滑油氧

化,加速生成油泥等沉淀物,影响发动机可靠性和使用寿命,更严重时会引起发动机着火、爆炸等事故^[1-3]。

燃油污染可通过发动机试制现场滑油箱中油量异常上涨、润滑油气味异常等现象初判,后续还要将油液样本送往分析实验室做进一步检测。传统检测方法如闪点法、粘度法^[4]等需要的样本数量多,分析时间长,不能满足快速检测的需要。而红外光谱是 1 种快速、无损、“绿色”的分析技术,已被广泛应用于诸多行业^[5-7]。在润滑油监测领域,利用傅里叶变换红外光谱

收稿日期:2014-09-17 基金项目:航空动力基础研究项目资助

作者简介:刘宇佳(1984),女,硕士,工程师,从事航空发动机在用油液状态监控技术研究及试验分析工作;E-mail:liuyujialady@163.com。

引用格式:刘宇佳,郎宏,何山,等. 航空发动机燃油污染快速检测技术的初步研究[J]. 航空发动机,2015,41(4):69-72. LIU Yujia, LANG Hong, HE Shan, et al. Preliminary study on rapid detection technology of fuel contamination in lubrication system of aeroengine[J]. Aeroengine, 2015, 41(4):69-72.

技术(FTIR)可以获知润滑油中的水分^[8]、积炭、氧化产物、硝化产物、硫化产物以及各种添加剂的变化^[9-12]。偏最小二乘法是化学计量学中常用的定量分析方法,可提取红外光谱中有用的光谱信息,有效消除干扰和噪声^[13-15]。

本文基于傅里叶红外光谱分析技术,开展了航空发动机滑油系统受到燃油污染的快速检测技术研究。采用偏最小二乘方法,初步建立傅里叶红外光谱检测模型,以实现润滑油中燃油污染的快速、定量检测。该方法可用于航空发动机润滑系统的故障监测及预防,为发动机安全可靠地运行提供技术保证。

1 设备与方法

1.1 仪器设备

Nicolet is 10 傅里叶变换红外光谱仪可多次全反射 ARK 采样附件。光谱数据分析处理软件为 OMNIC 8.3 及 MATLAB 7.1。

1.2 样本制备

选择航空发动机在用的某牌号合成航空润滑油与喷气燃料,分别配制燃油质量分数为(0~8)%的混合油液样本,共 46 个分析样本。从各样本中随机选取 39 个作为建模集用于建立校正模型,建模集燃油质量分数见表 1。其余 7 个样本作为预测集。

表 1 建模集样本燃油质量分数 %

样本号	质量分数	样本号	质量分数	样本号	质量分数
1	0	14	2.02	27	4.18
2	0	15	2.04	28	4.19
3	0	16	2.21	29	4.28
4	0	17	2.47	30	4.36
5	0	18	2.63	31	4.57
6	0	19	2.74	32	4.78
7	0.87	20	2.97	33	5.18
8	1.00	21	3.14	34	5.56
9	1.00	22	3.15	35	6.44
10	1.00	23	3.19	36	6.81
11	1.20	24	3.50	37	7.30
12	1.85	25	4.07	38	7.78
13	1.96	26	4.09	39	8.23

1.3 红外光谱采集

采用多次全反射 ARK 采样附件采集油液样本的红外光谱,扫描范围为 4000~650 cm⁻¹,光谱分辨率

为 4 cm⁻¹,扫描信号累计 32 次。取 1 mL 样本使之均匀分布于 ARK 样本槽内,以空气为背景,采集谱图。

1.4 数据处理

偏最小二乘法利用主成分分析将吸光度矩阵和质量分数矩阵分别分解为特征向量和载荷向量,然后用偏最小二乘回归在这些隐含量之间建立相互关系,从而得到吸光度矩阵与质量分数矩阵之间的数学校正模型。

本研究应用 MATLAB 7.1 软件对所有数据进行处理与计算。采用去一交叉验证法,校正集样本的交叉验证均方根误差(R_{MSECV})为优化模型参数,选择最佳的波长范围与光谱预处理方法,以 R_{MSECV} 和预测残差平方和(P_{RESS})为优化参数选择最佳 PLS 因子数。以预测均方根误差(R_{MSEP})、预测集样本质量分数的预测值与实际值间的回归系数(R)和重现性试验标准偏差(S_D)考核模型的预测能力。均方根误差(R_{MSE})按式(1)计算,P_{RESS}按式(2)计算。

$$R_{MSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_{yi} - Y_i)^2}{n}} \quad (1)$$

式中:n 为样本数;Y_{y,i} 为样本的预测值;Y_i 为样本的实际值。

$$P_{RESS} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^f (Y_{y,ij} - Y_{ij})^2 \quad (2)$$

式中:n 为建模集样本数;f 为建立校正模型使用的 P_{LS} 因子数;Y_{y,ij} 为样本的预测值;Y_{ij} 为样本的实际值。

2 结果与分析

2.1 红外光谱分析

润滑油与喷气燃料的红外谱如图 1 所示。润滑油与喷气燃料均为碳氢化合物,试验中使用的航空合成润滑油由合成酯类基础油

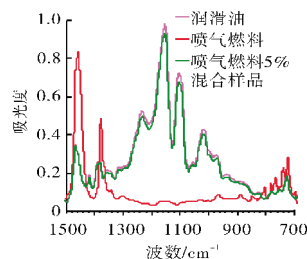


图 1 油液样本红外光谱

与多种抗氧化、抗腐蚀、抗磨损等添加剂组成。喷气燃料的芳性组分含量比润滑油的高,常以 750~850 cm⁻¹ 附近芳烃碳氢键的弯曲振动峰为特征峰进行红外检测^[15],当润滑油中喷气燃料掺混量较低时,喷气燃料的吸收峰被润滑油较强的吸收峰覆盖,很难在谱图中分辨出来,不能对混入的喷气燃料进行鉴别。利用多波长校正可从复杂的光谱信

息中提取有用信息,剔除冗余信息,建立校正模型,再利用校正模型预测未知样本组成和性质。分析区域可以是全谱或某一波数范围,喷气燃料在 700 ~ 1500 cm⁻¹ 范围内可见甲基、亚甲基和芳烃等的特征吸收峰,因此选择该区域作为分析区域进行建模。

2.2 光谱范围及预处理方法选择

以模型的 R_{MSECV} 值作为优化参数,考察不同光谱范围及预处理方法对模型预测能力的影响。对原始光谱和经过 ATR 校正的光谱进行纵坐标归一化处理,以排除其它因素的干扰。计算 2 种不同光谱预处理方法在不同波数范围建立模型的 R_{MSECV} 值,所得结果见表 2。从表中可见,经原始光谱归一化后的光谱在 700 ~ 900、1250 ~ 1500 cm⁻¹ 范围内建模得到的 R_{MSECV} 值最小,说明对于检测燃油污染最有利的是未经 ATR 校正的原始光谱,最佳分析波长范围为 700 ~ 900、1250 ~ 1500 cm⁻¹。

表 2 不同光谱范围及预处理方法对模型

R _{MSECV} 值的影响		
波长范围 /cm ⁻¹	原始光谱纵坐标归一化	ATR 校正光谱纵坐标归一化
700 ~ 1500	0.584	0.607
1250 ~ 1500	0.269	0.380
900 ~ 1250	1.187	1.280
700 ~ 900	0.361	0.425
700 ~ 900、1250 ~ 1500	0.237	0.354

2.3 PLS 因子数选择和交叉验证

采用 PLS 方法建立定量分析模型,PLS 因子数(主成分数)的选择直接影响到模型的实际预测能力。若 PLS 因子数过少,不足以反映样本的光谱信息;若 PLS 因子数过多,则会将噪声信息加入计算,降低模型的预测能力。本研究采用去一交互验证方法,应用 R_{MSECV} 和 P_{RESS} 值为优化参数确定最佳的 PLS 因子数,即每次从样本中选择 1 个样本作为预测集,其余样本构成建模集,建立模型,在不同因子数下计算所构建模型的 R_{MSECV} 和 P_{RESS} 值,交互验证的 R_{MSECV} 和 P_{RESS} 值越小,代表模型的预测能力越好。

润滑油燃油污染定量分析模型交叉验证的结果如图 2 所示。从图中可见,随着因子数的增加,R_{MSECV} 和 P_{RESS} 值呈现先降后升的趋势。当因子数为 19 时,R_{MSECV} 和 P_{RESS} 值最小,此时模型的预测能力最好。当 PLS 因子数 >19 后,R_{MSECV} 和 P_{RESS} 值又开始增大,说明

在该点后引入的隐变量是与被测组份无关的噪声,参与建模会降低模型的预测能力。因此,PLS 因子数为 19 时最佳。

2.4 最佳 PLS 定量分析模型的建立

对采集 39 个建模集样本在 700 ~ 1500 cm⁻¹ 范围的原始红外光谱进行纵坐标归一化处理。建模集的红外光谱如图 3 所示。从图中可见,不同质量分数的润滑油与喷气燃料混合样本的红外谱线相互重叠,没有明显差别,吸收强度与质量分数间相关性差,难以通过常规分析定量,需通过建立光谱模型实现喷气燃料的检测。

将 700 ~ 900、1250 ~ 1500 cm⁻¹ 范围的光谱数据作为输入变量,样本所含喷气燃料质量分数作为预测值,选择 PLS 因子数为 19 建立 PLS 模型。应用所建立的校正模型对预测集样本的燃油含量进行预测分析,7 个预测集结果见表 3。光谱预测值均能很好地接近于实际值。预测集样本实际值与预测值的相关性如图 4 所示。预测值与实际值之间的相关系数 R=0.9994。预测均方根误差 R_{MSEP}=0.082,表明所建模型具有良好的预测能力,能够满足实际应用需要。

2.5 重复性试验

随机选取任意 3 个燃油含量的样本,依据上述方法重复测定 5 次,结果见表 4。5 次重复测定结果的 S₀ 分别为 0.044、0.088、0.055。表明方法的重复性良好。

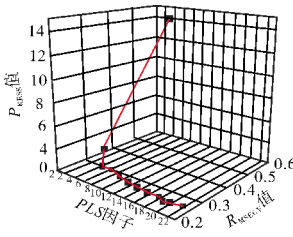


图 2 去一交互验证的 R_{MSECV} 和 P_{RESS} 值随 PLS 因子数变化

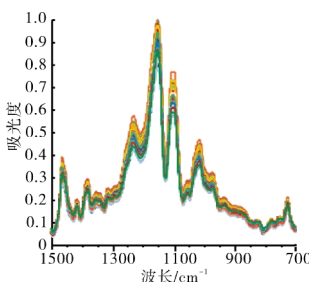


图 3 建模样本的红外光谱

表 3 预测集样本预测结果

%		
实际值	预测值	偏差
0	0.03	0.03
1.09	1.11	0.02
2.07	2.13	0.06
3.08	2.95	-0.13
4.20	4.10	-0.10
6.18	6.21	0.03
7.26	7.38	0.12

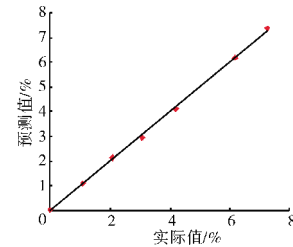


图 4 样本预测值与实际值相关性

表4 样本重复测定结果

样本号	预测值						平均值	% S _D
3	-0.07	-0.08	-0.04	0.03	-0.02	-0.04	0.044	
24	3.54	3.57	3.58	3.40	3.42	3.52	0.088	
33	5.16	5.08	5.06	5.19	5.14	5.13	0.055	

3 结束语

本研究以某发动机研制中使用的特定牌号航空合成润滑油与喷气燃料为研究对象,在润滑油中混入质量分数为0~8%的燃油建立红外光谱定量检测模型。通过选择合适的光谱分析范围、光谱预处理方法和PLS因子数对模型进行优化。应用该模型对已知燃油含量的样本进行预测,得到较为满意的结果。初步验证了红外光谱结合PLS方法应用于航空发动机燃油污染定量检测是可行的。

本研究关注的是某牌号润滑油中燃油污染的早期发现,建立的红外模型具有较强的针对性。在其他航空发动机研制中,也可以利用本研究成果,建立专门的红外光谱定量检测模型,对润滑油中燃油污染进行快速检测。

参考文献:

- [1] 李咏. 润滑油闪点测定在发动机修理中的运用[J]. 润滑油, 2010, 25(3): 43-46.
LI Yong. Application of lubricant flash point determination in engine maintenance[J]. Lubricating Oil, 2010, 25(3): 43-46. (in Chinese)
- [2] 陈钊, 兰琳, 陈群. 柴油机润滑系统故障分析及预防措施[J]. 煤矿机械, 2007, 28(9): 196-198.
CHEN Zhao, LAN Lin, CHEN Qun. Fault analysis and preventive measure to lubricating system of diesel engine [J]. Coal Mine Machinery, 2007, 28(9): 196-198. (in Chinese)
- [3] 孙晓军, 吴新, 栾东. 航空发动机燃油系统抗污染综述[J]. 航空发动机, 2010, 36(6): 1-5.
SUN Xiaojun, WU Xin, LUAN Dong. Review of anti-fouling technologies for aeroengine fuel system [J]. Aeroengine, 2010, 36(6): 1-5. (in Chinese)
- [4] 张占纲, 郭绍辉, 宋兰琪, 等. 航空发动机串油故障分析研究[J]. 宇航材料工艺, 2005(4): 58-61.
ZHANG Zhongang, GUO Shaohui, SONG Langqi, et al. Analysis of abnormal serial connection of different oil system in aeroengine [J]. Aerospace Materials and Technology, 2005(4): 58-61. (in Chinese)
- [5] 王桂清, 刘敏娜. 红外光谱技术的近代进展及其应用[J]. 现代仪器, 2002(2): 1-4.
WANG Guiqing, LIU Minna. Recent advances and application in technology of infrared spectroscopy [J]. Modern Instruments, 2002(2): 1-4. (in Chinese)
- [6] 薛进, 张九渊, 王春涛. 红外波谱技术在轴承润滑脂分析上的应用[J]. 轴承, 2003(7): 25-29.
XUE Jin, ZHANG Jiuyuan, WANG Chuntao. Application of infrared spectrum technique in bearing grease analysis [J]. Bearing, 2003(7): 25-29. (in Chinese)
- [7] 邹春海, 冯均利, 李勇, 等. 食用油的红外吸收光谱分析[J]. 光谱实验室, 2013, 30(3): 1099-1102.
ZOU Chunhai, FENG Junli, LI Yong, et al. Analysis of cooking oil by transform infrared spectroscopy [J]. Chinese Journal of Spectroscopy Laboratory, 2013, 30(3): 1099-1102. (in Chinese)
- [8] 吴勇, 王彩云, 夏志新. 液压油含水量的红外光谱测量方法研究[J]. 中国矿业大学学报, 2000, 29(2): 195-198.
WU Yong, WANG Caiyun, XIA Zhixin. Study on infrared spectrum monitoring water content in hydraulic oil[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2000, 29(2): 195-198. (in Chinese)
- [9] 马兰芝, 褚小立, 田松柏, 等. 红外光谱法在润滑油分析中的应用与研究进展[J]. 分析仪器, 2010(2): 1-4.
MA Lanzhi, CHU Xiaoli, TIAN Songbai, et al. Progress of application of infrared spectroscopic techniques in analysis of lubricating oil[J]. Analytical Instrumentation, 2010(2): 1-4. (in Chinese)
- [10] 陈学锋, 赵质良. 红外光谱分析技术在船舶装备油液监测中的应用[J]. 机械管理开发, 2009, 24(6): 7-8.
CHEN Xuefeng, ZHAO Zhiliang. Application of the infrared spectrum analysis in lube monitoring[J]. Mechanical Management and Development, 2009, 24(6): 7-8. (in Chinese)
- [11] 化岩, 史永刚, 任连岭, 等. 红外光谱技术在润滑油分析中的应用[J]. 合成润滑材料, 2008, 35(2): 5-7.
HUA Yan, SHI Yonggang, REN Lianling, et al. Applications of infrared spectroscopy technique on lubricating oil analysis [J]. Synthetic Lubricants, 2008, 35(2): 5-7. (in Chinese)
- [12] 徐杰, 阮竹, 李象塔. 汽油机油在使用过程中老化降解规律的红外光谱研究[J]. 润滑油, 1994, 9(6): 28-34.
XU Jie, RUAN Zhu, LI Xiangrong. An IR spectra study on ageing and degradation regular pattern of engine oil in use [J]. Lubricating Oil, 1994, 9(6): 28-34. (in Chinese)
- [13] 石新发, 刘东风, 周志才. 船舶柴油机在用润滑油 FT-IR 光谱特征信息提取与应用[J]. 内燃机工程, 2013, 34(5): 81-86.
SHI Xinfa, LIU Dongfeng, ZHOU Zhicai. Extraction and application of FTIR spectrum feature information for in-using lube oil of marine diesel engine [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2013, 34(5): 81-86. (in Chinese)
- [14] 冯新沪, 罗平亚, 史永刚, 等. 发动机润滑油高温清净性能的偏最小二乘法预测[J]. 现代科学仪器, 2002(5): 22-24.
FENG Xinhui, LUO Pingya, SHI Yonggang, et al. Predicting high temperature detergent performance of engine lubricant by PLS [J]. Modern Scientific Instruments, 2002(5): 22-24. (in Chinese)
- [15] 杨旭, 任芊, 黄友之, 等. 近红外光谱法用于含能材料快速分析的研究[J]. 北京理工大学学报, 2002, 22(5): 646-649.
YANG Xu, REN Qian, HUANG Youzhi, et al. On-line rapid measurement of volatile ingredients in propellant products with the NIR spectroscopy method [J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2002, 22(5): 646-649. (in Chinese)
- [16] 金瓯, 任天辉. FTIR 红外光谱在燃油稀释评价中的应用[J]. 光谱实验室, 2013, 30(3): 1422-1426.
JIN Ou, REN Tianhui. Application of FTIR to the evaluation of diesel dilution in lubricant[J]. Chinese Journal of Spectroscopy Laboratory, 2013, 30(3): 1422-1426. (in Chinese)

(编辑:赵明菁)